

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО – КАВКАЗСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»
СРЕДНЕПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ КОЛЛЕДЖ**

Технологическое отделение
Цикловая комиссия «Экономические дисциплины»

ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ

по учебному предмету: «Физика»

На тему : «Акустические свойства полупроводников»

**Специальность 35.02.16 Эксплуатация и ремонт
сельскохозяйственной техники и оборудования**

**Автор: Обучающийся группы 35.02.16-211
Коркмазов Кемран Ильясович**

**РУКОВОДИТЕЛЬ:
ПРЕПОДАВАТЕЛЬ:**

Черкесск, 2022 г.

Содержание

Введение.....	3
1. Общая характеристика полупроводниковых материалов.....	4
2. Электропроводность полупроводников.....	6
3. Поглощение и усиление звука.....	8
4.	12
Заключение.....	14
Список использованных нормативных источников и литературы.....	16

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводник — материал, который по своей удельной проводимости занимает промежуточное место между проводниками и диэлектриками и отличается от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и воздействия различных видов излучения. Основным свойством полупроводника является увеличение электрической проводимости с ростом температуры.

В полупроводниках имеет смысл изучать, прежде всего, те акустические эффекты, которые обусловлены взаимодействием звука с электронами проводимости. В конце концов, именно небольшое количество электронов проводимости отличает полупроводник от диэлектрика. Типичные концентрации электронов в тех случаях, которые нас интересуют, составляют $10^{11} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Рассмотрим акустические эффекты только в одном типе полупроводника, а именно в пьезоэлектрических полупроводниках. Акустические эффекты в них наиболее выражены, лучше всего и наиболее тщательно исследованы.

Пьезоэлектрики - это кристаллы, в которых под действием равномерной деформации возникает дипольный момент и, следовательно, электрическое поле, пропорциональное деформации.

Цель проекта – исследование акустических свойств полупроводников.

Для наиболее полного достижения цели необходимо поставить следующие задачи:

1. Дать общую характеристику полупроводниковых материалов;
2. Изучить электропроводность полупроводников;
3. Описать поглощение и усиление звука;
4. Изучить усиление акустических шумов и связанные с этим явления

1. Общая характеристика полупроводниковых материалов

Полупроводник – это материал, основным свойством которого является сильная зависимость его электрической проводимости от воздействия внешних факторов, таких, как температура, электрическое поле, свет и т. д.

Полупроводники бывают простые и сложные.

Полупроводник, основной состав которого образован атомами одного химического элемента, называется простым.

Полупроводник, основной состав которого образован атомами двух и более химических элементов, является сложным.

В полупроводниках носителями заряда, обуславливающими электрическую проводимость, являются дырки проводимости и электроны.

Полупроводник, не содержащий примесей, влияющих на его электропроводность, называется собственным полупроводником.

Электропроводность собственного полупроводника в равновесном состоянии обусловлена как дырками проводимости, так и электронами проводимости, причем их концентрации равны. Полупроводник, электропроводность которого определяется примесями, называется примесным полупроводником. Полупроводник, электропроводность которого обусловлена в основном перемещением дырок проводимости, примесями, называется дырочным полупроводником.

У электронного полупроводника проводимость обусловлена в основном электронами проводимости.

Полупроводники отличаются от других классов твердых материалов многими специфическими особенностями, главными из которых являются:

1. Положительный температурный коэффициент электропроводности, то есть с повышением температуры электропроводность полупроводников растет.
2. Удельная проводимость полупроводников меньше, чем у металлов, но больше, чем у изоляторов.

3. Большие значения термоэлектродвижущей силы по сравнению с металлами.

4. Высокая чувствительность свойств полупроводников к ионизирующим излучениям.

5. Способность резкого изменения физических свойств под влиянием ничтожно малых концентраций примесей.

6. Эффект выпрямления тока или неомическое поведение на контактах.

Среди простых веществ полупроводниками являются бор, кремний, германий, серое олово, некоторые модификации фосфора, мышьяк и сурьмы, а также селен, теллур и иод. Недавно открыта новая модификация углерода – фуллерит, который является полупроводником в отличие от алмаза и графита. Помимо них известны многочисленные полупроводниковые соединения: оксиды, сульфиды, селениды, теллуриды, арсениды, антимониды, интерметаллические полупроводники, тройные и более сложные полупроводниковые соединения.

Если считать, что электропроводность металлов составляет порядка $10^6 - 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, а изоляторов меньше $10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, то удельная проводимость полупроводников находится в интервале $10^{-10} - 10^3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Таким образом, проводимость полупроводников промежуточная между металлами и изоляторами.

Неорганические полупроводники, как правило, обладают координационной структурой, то есть в их пространственных решетках отсутствуют молекулы. То есть они обладают немолекулярной структурой. Поэтому макроскопическое тело полупроводника состоит либо из большого числа одинаковых атомов (простое вещество), либо также из большого числа (порядка числа Авогадро) различных атомов (соединения).

Важнейшую роль играют поверхностные свойства полупроводников. Нередко поверхностные энергетические уровни и зависящие от них свойства

преобладают над объемными характеристиками полупроводников. Поэтому, чтобы улучшить электрофизические характеристики полупроводниковых приборов, в приборостроении особое внимание обращают на травление поверхности, влияние адсорбированных газов, присутствие посторонних внешних примесей.

2. Электропроводность полупроводников

У полупроводников между валентной зоной и зоной проводимости имеется запрещенная зона. При температуре абсолютного нуля и в отсутствие внешнего воздействия их валентная зона полностью заполнена, а зона проводимости свободна от электронов.

К п/п – кам условно относят вещества с шириной запрещенной зоны $\Delta W_i = 0.05-3.0$ эВ.

Область или зона энергетических состояний электронов, находясь в которой они могут создавать ток, носит название зоны проводимости.

Для многих полупроводников достаточно невысокой температуры (например, комнатной), чтобы перевести некоторое количество электронов их атомов в зону проводимости. Непрерывное повышение температуры усиливает процесс такого перехода и проводимость полупроводника в результате этого увеличивается.

Итак, электропроводность в полупроводниках обуславливается электронами. Она называется электронной электропроводностью или электропроводностью n-типа. В данном случае электроны, создающие ток, принадлежат атомам самого полупроводника, а не атомам примеси, поэтому такую электропроводность называют собственной.

У атома, электрон которого перешел в зону проводимости, образовался, таким образом, недостаток одного электрона. Такие атомы превращаются в положительные ионы, которые, однако, закреплены на месте и не в состоянии двигаться и принимать участие в создании тока. Место

отсутствующего электрона может занять электрон с соседнего атома, у которого такого недостатка нет. В результате этого перехода появится у второго атома недостаток в электроне. Подобный процесс может иметь место одновременно у многих атомов.

Если приложить электрическое напряжение, перескок электронов с одних атомов на другие (соседние) примет характер направленного перемещения их в одну сторону. Одновременно с этим образующиеся положительно заряженные атомы будут возникать в направлении, противоположном движению электронов. Это будет похоже на движущиеся положительные заряды, т. е. на ток, создаваемый положительными электрическими зарядами, которые движутся в направлении, противоположном движению электронов.

Отсутствие в атоме электрона в результате перехода его в зону проводимости получило название дырки ('в атоме). Электрический же ток, образующийся при движении дырок, называют дырочным током. Электропроводность, обусловленная этим дырочным током, называется дырочной электропроводностью или электропроводностью р-типа .

Полупроводники, не содержащие донорные и акцепторные примеси, называют собственными полупроводниками, а содержащие - примесными.

Итак, движение электронов (в одном направлении) и дырок атомов (в обратном направлении) самого полупроводника создает собственную электропроводность, которая с повышением температуры возрастает. Понижение же температуры будет уменьшать собственную электропроводность полупроводника, так как будет уменьшаться число электронов, переходящих в зону проводимости. Поэтому полупроводники при охлаждении приближаются к диэлектрикам по величине их сопротивления.

В полупроводниках и диэлектриках при температуре 0°K все электроны находятся в валентной зоне, а зона проводимости абсолютно свободна.

Электроны полностью заполненной зоны не могут принимать участия в создании электрического тока.

Для появления электропроводности необходимо часть электронов перевести из валентной зоны в зону проводимости. Энергии электрического поля недостаточно для осуществления этого перехода, требуется более сильное энергетическое воздействие, например, нагревание твердого тела.

Чем выше температура и меньше запрещенная зона, тем выше интенсивность межзонных переходов.

У диэлектриков запрещенная зона может быть настолько велика, что электронная электропроводность не играет определяющей роли.

Если каждый атом имеет, например, 4 валентных электрона, являющихся общими для 4 ближайших атомов (конфигурация валентных связей), то такое твердое тело является полупроводником. Например, в германии и кремнии, являющихся четырехвалентными элементами, на наружной оболочке имеется по четыре ковалентные связи с четырьмя ближайшими, окружающими его атомами.

3. Поглощение и усиление звука

При распространении бегущей звуковой волны пространственное распределение электронов стремится следовать за пространственным распределением пьезоэлектрического потенциала. Соответственно переменные пьезоэлектрические поля порождают переменные электронные токи, которые и «подстраивают» распределение электронов к распределению потенциала. При протекании этих токов в проводнике должно выделяться джоулево тепло. В результате при распространении звука механическая энергия звуковой волны переходит в энергию беспорядочного теплового движения, т. е. происходит поглощение звука. Интенсивность поглощаемого звука изменяется по закону:

$$S(x) = S(0) \exp(-\Gamma x),$$

где $S(0)$ — интенсивность «на входе» кристалла. Величина Γ называется коэффициентом поглощения звука.

Для отношения коэффициента поглощения звука Γ к величине его волнового вектора q можно получить следующее выражение:

$$\Gamma / q = \chi \omega \tau / ((1 + q^2 R^2)^2 + (\omega \tau)^2)$$

Частотной зависимости этого выражения можно дать следующее наглядное объяснение.

Переменный ток, создаваемый пьезоэлектрическим почтем, вызывает перераспределение свободных зарядов. Перераспределенные заряды, в свою очередь, создают добавочное электрическое поле. Оно, как уже говорилось, направлено противоположно первоначальному электрическому, полю и, следовательно, приводит к уменьшению тока проводимости; τ и есть то время, за которое происходит перераспределение свободных зарядов. При статической деформации заряды перераспределяются и их поле компенсирует (экранирует) пьезоэлектрическое поле. Таким образом, что ток становится равным нулю.

Если деформация измеряется с частотой ω , которая гораздо меньше $1/\tau$, устанавливается почти полная компенсация. Точнее, поле объемных зарядов в случае переменной деформации, создаваемой звуком, отличается от статического поля на малую величину, пропорциональную $\omega \tau$. Поэтому в пьезоэлектрике протекает переменный ток, пропорциональный той же малой величине $\omega \tau$. Соответственно коэффициент Γ , определяемый квадратом плотности тока, оказывается пропорциональным ω^2 .

В обратном предельном случае больших $\omega \tau$ поле объемных зарядов за период звука вообще не успевает возникнуть. Поэтому при $\omega \tau \gg 1$ коэффициент пропорциональности между плотностью тока и электрическим

полем оказывается вообще независимым от частоты. Не зависит от частоты и коэффициент Γ . Член $(\omega\tau)^2$ в знаменателе (5) и обеспечивает предельный переход от одного случая к другому. Наконец, при $qR \gg 1$ коэффициент поглощения быстро убывает при увеличении частоты. Это связано с тем (уже отмечавшимся выше) обстоятельством, что звуковая волна, длина которой гораздо меньше радиуса экранирования, почти не вызывает перераспределения заряда даже в статическом случае.

Коэффициент поглощения достигает максимального значения при частоте $\omega_m = \omega_0/R$, т. е. когда длина волны равна $2\pi R$; максимальное значение Γ_{m0} коэффициента поглощения равно $\chi/4R$.

Характер частотной зависимости коэффициента поглощения определяется величиной $\omega_m\tau$. Если $\omega_m\tau \ll 1$, то максимум получается сравнительно острым.

В противоположном предельном случае коэффициент поглощения растет пропорционально ω^2 вплоть до частот порядка $1/\tau$, после чего его рост становится очень медленным. Максимум в этом случае оказывается более пологим. При $\omega \gg \omega_m$ коэффициент поглощения во всех случаях убывает пропорционально ω^2 . Семейство $\Gamma(\omega)$ при разных значениях $\omega_m\tau$ приведено на рис. 3.

Интересно проследить характер зависимости коэффициента поглощения Γ от электронной концентрации n_0 . Обычно проводимость σ пропорциональна n_0 : $\sigma = e n_0 \mu$, где μ - так называемая подвижность электронов. Таким образом, максвелловское время релаксации τ обратно пропорционально n_0 . Радиус экранирования R , как мы видели, обратно пропорционален $\sqrt{n_0}$ (см. (4)). Поэтому при малых концентрациях электронов коэффициент Γ прямо пропорционален n_0 , а при больших - обратно пропорционален n_0 . Существует, таким образом, при любой частоте (о некоторая промежуточная концентрация n_w , при которой коэффициент Γ максимален.

Оценим коэффициент поглощения Γ для какого-нибудь типичного случая. Рассмотрим, например, поперечный звук в CdS, скорость которого $\omega_0 = 1,8 \times 10^5$ см/с. Пусть $n_0 = 5 \times 10^{12}$ см⁻³, $\omega = 3 \times 10^8$ с⁻¹, $\mu = 300$ см²/Вс, $\chi = 0,036$, $\varepsilon = 9,4$, $T=300$ К. Тогда $\tau = 3,5 \times 10^{-9}$ с, $R = 1,6 \times 10^{-4}$ см, $q = 1,7 \times 10^3$ см⁻¹, и мы получаем, что коэффициент Γ составляет около 30 см⁻¹. Это означает, что на расстоянии в $1/30 \sim 0,03$ см интенсивность звука затухает в 30 раз, т. е. теория предсказывает сильное затухание уже при таких малых концентрации и частоте.

Стоит отметить, что скорость звука зависит не только от величины, но и от направления электрического поля по отношению к направлению распространения звука. Соответственно скорости волн, распространяющихся вдоль и навстречу полю, различны.

4. Усиление акустических шумов

Акустические шумы - беспорядочные колебания частиц среды, в частности воздуха, отличающиеся сложностью временной и спектральной структурой. Источниками акустического слышимого и неслышимого шума, как и источником любого звука, могут быть любые колебания в твердых, жидких и газообразных средах.

Проблема усиления шумов в пьезополупроводниках очень сложна и к настоящему времени полностью не решена. Поэтому здесь мы обсудим лишь главные особенности усиления шума и основные возникающие вопросы.

Вследствие анизотропии пьезоэлектрического взаимодействия и скорости звука коэффициент усиления звука зависит от направления его распространения. Коэффициент усиления звука имеет максимум на частоте ω_0 , которая пропорциональна $\sqrt{n_0}$.

Интенсивность шумов растет по мере удаления от края кристалла. Быстрее всего нарастает интенсивность тех звуковых волн, которые распространяются вдоль направления дрейфа и имеют частоту ω_0 . Поэтому

по мере удаления от края кристалла и угловое и частотное распределения интенсивности шумов обостряются.

В процессе усиления интенсивность шумов возрастает настолько, что их уже нельзя считать независимыми. Возникает состояние, до некоторой степени напоминающее гидродинамическую турбулентность. В этом состоянии движение имеет беспорядочный, хаотический характер, и большую роль играет взаимодействие отдельных шумовых компонент.

Определяющую роль в формировании акустического турбулентного состояния, как правило, играют коллективные движения электронов полупроводника. Хорошо известен один тип таких коллективных движений — плазменные колебания. Это колебания электронной плотности, период которых намного меньше времени свободного пробега электронов проводимости. Между тем со звуковыми шумами могут взаимодействовать только медленные движения с характерным временем, сравнимым с периодом звука (т. е. значительно превышающим время свободного пробега электронов проводимости).

Характеристики турбулентного состояния определяются, естественно, свойствами нелинейного коэффициента усиления. Расчеты показывают, что нелинейный коэффициент усиления имеет максимум на более низкой частоте, чем линейный. В результате спектр шумов в процессе усиления смещается в область более низких частот — взаимодействие шумов через посредство движений электронной концентрации приводит к «перекачке» энергии в эту область.

Такой режим усиления в принципе возможен, однако при таких условиях, которые на опыте реализовать совсем не просто. Может быть, по этой причине он до сих пор не наблюдался.

Расскажем еще об одном своеобразном проявлении турбулентного состояния. В этом состоянии нередко наблюдаются так называемые акустоэлектрические домены. Это — сгустки акустических шумов (ограниченные в пространстве волновые пакеты), периодически пробегающие по

кристаллу. Поскольку такие домены «захватывают» электроны проводимости, при этом наблюдаются осцилляции тока в цепи, в которую включен образец. Таким образом, полупроводник работает как генератор периодических электрических импульсов.

В целом задача об усилении шумов далеко не проста. К настоящему времени удалось построить лишь теорию так называемой слабой турбулентности, когда интенсивность выросших шумов еще достаточно мала. Уже эта теория имеет весьма сложный вид.

С другой стороны, достигнуты серьезные успехи в экспериментальном изучении акустической турбулентности в полупроводниках. В последние годы появилась экспериментальная техника, очень удобная для исследования поведения шумов. Это — изучение рассеяния света на усиленных акустических шумах. С помощью этой техники удастся изучать распределение волн как по направлениям распространения, так и по частотам в любой точке кристалла. Таким образом, можно получить весьма детальные сведения о нарастании акустических шумов. В связи с этим и в нашей стране и за рубежом сейчас ведется очень много работ по изучению поведения звуковых шумов в полупроводниках.

5. Звукоэлектрический эффект

До сих пор говорилось о поглощении и усилении звука электронами проводимости. Есть, однако, интересный эффект, о котором уже вкратце упоминалось, связанный с обратным влиянием звуковой волны на электроны, - звукоэлектрический эффект.

Бегущая звуковая волна увлекает за собой электроны проводимости, в результате чего, если замкнуть образец проводником, в цепи потечет звукоэлектрический ток. Если же образец разомкнут, то на его концах возникнет разность потенциалов, а внутри его — звукоэлектрическое поле $E_{зв}$. Оценить его можно из следующих соображений.

В процессе поглощения звука электронам, заключенным в единице объема, в единицу времени передается энергия ΓS . Импульс, передаваемый при этом электронам, есть $\Gamma S/\omega$. С другой стороны, эта величина должна быть равна силе, действующей на эти электроны со стороны звукоэлектрического поля - $\epsilon n_0 E_{зв}$. В итоге получается следующая оценка:

$$E_{зв} = \Gamma S/\epsilon n_0 \omega$$

Соответственно звукоэлектрический ток равен:

$$j_{зв} = \sigma E_{зв} = \mu \Gamma S/\omega$$

Это соотношение легко понять качественно — чем больше поглощение звука, тем больший импульс передается от звука электронам и тем больше электронный ток.

Звукоэлектрический эффект в пьезополупроводниках имеет очень большую величину — при интенсивности звука $0,1 \text{ Вт/см}^2$ звукоэлектрическое поле может достигать $15\text{—}20 \text{ В/см}$. Поэтому звукоэлектрический эффект может быть использован как весьма чувствительный индикатор наличия звуковых волн в кристалле и измеритель их интенсивности.

Соотношения вышеуказанных формул остаются справедливыми и во внешнем электрическом поле, когда в полупроводнике наряду со звукоэлектрическим током течет также ток проводимости. Поэтому при пороговом значении электрического поля, когда поглощение звука сменяется его усилением, изменяет знак и звукоэлектрическое поле. Такую перемену знака легко понять физически: когда дрейфовая скорость электронов превышает скорость звука, звуковая волна уже не увлекает систему электронов, а тормозит ее как целое. Изменение знака звукоэлектрического эффекта неоднократно наблюдалось на опыте.

Звукоэлектрический эффект проявляется как при распространении звуковых сигналов, так и при усилении шумов. Он играет важную роль в формировании акустоэлектрических доменов, о которых говорилось выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе исследования мы выяснили, что полупроводник – это материал, основным свойством которого является сильная зависимость его электрической проводимости от воздействия внешних факторов, таких, как температура, электрическое поле, свет и т. д.

Рассмотрели ряд явлений, сопровождающих распространение ультразвука в полупроводниках и металлах. Начав с простых эффектов, мы подошли к сложным проблемам, находящимся на переднем крае современной физики твердого тела.

Акустические шумы - беспорядочные колебания частиц среды, в частности воздуха, отличающиеся сложностью временной и спектральной структурой. Источниками акустического слышимого и неслышимого шума, как и источником любого звука, могут быть любые колебания в твердых, жидких и газообразных средах.

В процессе усиления интенсивность шумов возрастает настолько, что их уже нельзя считать независимыми. Возникает состояние, до некоторой степени напоминающее гидродинамическую турбулентность

Определяющую роль в формировании акустического турбулентного состояния, как правило, играют коллективные движения электронов полупроводника. Хорошо известен один тип таких коллективных движений — плазменные колебания. Это колебания электронной плотности, период которых намного меньше времени свободного пробега электронов проводимости. Между тем со звуковыми шумами могут взаимодействовать только медленные движения с характерным временем, сравнимым с периодом звука (т. е. значительно превышающим время свободного пробега электронов проводимости).

Список использованных нормативных источников и литературы:

1.